Journal of Water and Soil
Homepage: https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 37, No. 5, Dec.-Jan., 2023, p. 721-731

Determination of the Optimal Ranges for Soil Pore Size Distribution Curve Parameters

M. Zangiabadi[1]*
1- Assistant Professor of Soil and Water Research Department, Khorasan-Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran
(* Corresponding Author Email: m.zangiabadi@areeo.ac.ir)

Received: 26-06-2023 Revised: 12-09-2023 Accepted: 23-09-2023 Available Online: 23-09-2023	**How to cite this article:** Zangiabadi, M. (2023). Determination of the Optimal Ranges for Soil Pore Size Distribution Curve Parameters. *Journal of Water and Soil, 37*(5), 721-731. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83150.1300

Introduction

Soil pore size distribution curve and using the optimal ranges of the location and shape parameters of this curve can be used to evaluate the soil physical quality. This research was carried out in an area of about 220 hectares of Torogh Agricultural and Natural Resources Research and Education Station, to determine the optimal ranges for soil pore size distribution curve parameters using the soil physical quality index. Different soil textures and the diversity in soil properties are the distinct features of this research station.

Materials and Methods

Torogh Agricultural and Natural Resources Research and Education Station of Khorasan-Razavi province, with a semiarid climate, is located in south-east of Mashhad city. For the field measurements and laboratory analysis to determine the soil physical properties and indices, 30 points with different soil textures and structures were selected. Intact soil cores (5 cm diameter by 5.3 cm length) and disturbed soil samples were collected from 0-30 cm depth of each point. After the laboratory analysis and field measurements, 35 soil physical properties were measured and calculated. Soil particle size distribution and five size classes of sand particles, soil bulk, and particle density, dry aggregates mean weight diameter (MWD) and stability index (SI), soil moisture release curve (SMRC) parameters, S-index, soil porosity (POR) and air capacity (AC), soil pore size distribution (SPSD) curves, relative field capacity (RFC), plant available water measured in matric pressure heads of 100 and 330 hPa for the field capacity (PAW_{100} and PAW_{330}), least limiting water range measured in matric pressure heads of 100 and 330 hPa for the field capacity ($LLWR_{100}$ and $LLWR_{330}$), integral water capacity (IWC) and integral energy (EI) of different soil water ranges, were the soil physical properties and indices which were determined in this study. Three parameters of modal, median, and mean pore sizes of the SPSD curves were considered as the location (central tendency), and three parameters of standard deviation, skewness, and kurtosis of the SPSD curves were considered as the shape parameters. Selection of the most important soil physical characteristics using principal component analysis (PCA) method by JMP software (ver. 9.02), weighting and scoring of the selected characteristics using PCA and scoring functions, respectively, and the summation of multiplied characteristics weights by their scores for each soil sample, were the four steps of calculation of the 0-1 value of soil physical quality index (SPQI). Soil samples were classified into four soil physical quality classes by SPQI values. The soils of the first class with the highest SPQIs (> 0.78) were considered to determine the optimal ranges of SPSD curves location and shape parameters.

Results and Discussion

https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83150.1300

The texture of soil samples were loam (40 %), silt loam (23 %), silty clay loam (17 %), clay loam (13 %), and sandy loam (7 %). Soil organic carbon was between 0.26-1.05 (%), and the average soil bulk density was 1.45 ($gr.cm^{-3}$). The MWD values of studied soil samples were between 0.94-2.88 (mm), an average of 1.93 (mm). The average modal, median, and mean pore sizes as the location parameters of the SPSD curves were 60.3 (μm), 12.4 (μm), and 6.5 (μm), respectively. The average of standard deviation, skewness, and kurtosis as the shape parameters of the SPSD curves were 71.56 (μm), -0.36 and 1.15, respectively. The average modal pore sizes showed that the pores with a size of 60 (μm) had the highest frequency in soil samples. The range of calculated standard deviation of SPSD curves, along with the difference between the minimum and maximum mean pore sizes (24.6 μm), implied the diversity of pore sizes in the studied soils. The results of PCA showed that the four soil physical properties of PAW_{330} (0.1-0.2 $cm^3.cm^{-3}$), POR_t (0.40-0.51 $cm^3.cm^{-3}$), $LLWR_{100}$ (0.12-0.22 $cm^3.cm^{-3}$) and SI (0.76-2.61 %) accounted for about 88% of the variance between soil samples and were selected to calculate the SPQIs. The PAW_{330}, POR_t, $LLWR_{100}$, and SI were entered into the calculation of SPQIs with weights of 0.46, 0.31, 0.15, and 0.08, respectively. All the selected physical properties were scored using the scoring function of more is better. The maximum and minimum values of SPQIs for the studied soils were 0.84 and 0.14, respectively. Five soil samples with SPQIs greater than 0.78 were classified as class 1 with the highest physical quality. The ranges between the minimum and maximum values of the SPSD curves, location, and shape parameters of these five soils were proposed as the optimal ranges. In this regard, the ranges of 29-92 (μm), 5-16 (μm), and 2-7 (μm) were suggested for optimal ranges of modal, median, and mean pore sizes, respectively. The optimal ranges of standard deviation, skewness, and kurtosis of the SPSD curves were proposed as 22-81 (μm), (-0.38)-(-0.33), and 1.14-1.15, respectively.

Conclusion

The optimal ranges of SPSD curves location and shape parameters suggested in the literature may probably not apply to a wide range of agricultural soils. They must be evaluated in a more extensive range of land uses, soil management, and soil textures. In this research, the soils with the relatively higher physical quality had larger mean pore size and less SPSD curves standard deviation (less diversity of pore size) than the optimal ranges suggested in the literature. The optimal ranges of SPSD curves location and shape parameters proposed in this research are appropriate for medium to coarse-textured soils of regions with the semiarid climate in Iran.

Keywords: Location parameters, Shape parameters, Soil physical quality

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۲، ص. ۷۳۱-۷۲۱

تعیین حدود بهینه شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ خاک

مهدی زنگی‌آبادی[۱*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

چکیده

منحنی توزیع اندازه منافذ خاک و استفاده از حدود بهینه شاخص‌های موقعیت و شکل این منحنی می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای بررسی و ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک استفاده گردد. پژوهش حاضر در اراضی ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی طرق واقع در جنوب شرقی شهر مشهد با هدف تعیین حدود بهینه شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ با استفاده از شاخص کیفیت فیزیکی خاک انجام شد. از ۳۰ نقطه در قسمت‌های مختلف ایستگاه با بافت و ساختمان متفاوت نمونه خاک تهیه و آزمایشات صحرایی و آزمایشگاهی لازم برای تعیین و محاسبه ۳۵ ویژگی فیزیکی خاک انجام شد. شاخص عددی کیفیت فیزیکی خاک در قالب انتخاب مهم‌ترین ویژگی‌ها با استفاده از تجزیه مؤلفه‌های اصلی، وزن‌دهی و امتیازدهی آنها محاسبه و از آن به‌عنوان معیاری جهت دسته‌بندی خاک‌های مورد مطالعه در چهار کلاس کیفیت خاک استفاده شد. خاک‌های کلاس یک با بیشترین کیفیت فیزیکی ملاک تعیین حدود بهینه شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه منافذ خاک قرار گرفت. نتایج نشان داد که خاک‌های با بیشترین کیفیت فیزیکی نسبی، دارای منافذ با میانگین اندازه بزرگتر و تنوع اندازه کمتر از مقادیر بهینه ارائه شده در منابع می‌باشند. در این مطالعه حدود بهینه شاخص‌های موقعیت منحنی توزیع اندازه منافذ شامل میانگین، میانه و مد اندازه منافذ به‌ترتیب ۷-۲، ۱۶-۵ و ۹۲-۲۹ میکرومتر و شاخص‌های شکل شامل انحراف معیار، کشیدگی و افراشتگی منحنی به‌ترتیب ۸۱-۲۲ میکرومتر، (۰/۳۳-)-(۰/۳۸-) و ۱/۱۵-۱/۱۴ تعیین گردید. استفاده از نتایج این مطالعه به‌منظور ارزیابی و مقایسه کیفیت فیزیکی خاک‌های با بافت متوسط و سبک در مناطق با اقلیم نیمه‌خشک ایران توصیه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: شاخص‌های شکل، شاخص‌های موقعیت، کیفیت فیزیکی خاک

مقدمه

اولین گام در راستای مطالعات کیفیت خاک شناسایی شاخص‌های اصلی و تعیین حدود بهینه این شاخص‌ها می‌باشد. رینولدز و همکاران (Reynolds *et al*., 2008) کیفیت خاک را رکن اصلی کمی‌سازی میزان تغییرات شرایط اراضی و انتخاب و اعمال بهترین مدیریت اراضی می‌دانند. این محققین معتقدند که بررسی و ارزیابی کیفیت خاک شامل چهار مرحله است:

۱) تعیین یک یا چند عامل خاکی به عنوان شاخص‌های کیفیت خاک، ۲) تعیین دامنه مطلوب و یا مقادیر حداکثر و حداقل مقدار این شاخص‌ها، ۳) کمی‌سازی وضعیت فعلی کیفیت خاک از طریق مقایسه مقادیر شاخص‌های آن با دامنه‌های مطلوب و ۴) تعیین روند ارتقاء، تنزل، یا پایدار ماندن کیفیت خاک در مقایسه با شرایط قبلی.

عموماً هنگامی‌که سخن از کیفیت خوب به میان می‌آید، منظور این است که شاخص‌های کیفیت خاک در دامنه مطلوب قرار دارند و یا حداقل خارج از حدود بحرانی نیستند.

در منابع، خصوصیات مختلف و شاخص‌های متفاوتی برای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک مطرح شده است. یکی از مهمترین این ویژگی‌ها،

۱- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان‌رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: m.zangiabadi@areeo.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83150.1300

وضعیت توزیع اندازه منافذ خاک[1] بوده که بسیاری از خصوصیات فیزیکی خاک شامل اندازه دامنه رطوبتی (آب قابل استفاده[2]، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت[3] و گنجایش انتگرالی آب[4]) و انرژی انتگرالی[5] در دامنه‌های مختلف رطوبتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و عموماً در قالب منحنی توزیع اندازه منافذ خاک و شاخص‌های مربوطه مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمودار حاصل از ارتباط شیب منحنی رطوبتی خاک[6] (رطوبت حجمی خاک در مقابل لگاریتم طبیعی مکش ماتریک) در مقابل اندازه منافذ (میکرومتر) در مقیاس لگاریتمی، منحنی توزیع اندازه منافذ خاک نامیده می‌شود (Reynolds *et al.*, 2009). شاخص های مختلف موقعیت[7] و شکل[8] منحنی به منظور ارزیابی و بررسی وضعیت منافذ خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این راستا سه شاخص مُد[9]، میانه[10] و میانگین[11] اندازه منافذ خاک به‌عنوان شاخص‌های موقعیت (تمایل به مرکز) و سه شاخص انحراف‌معیار[12]، کشیدگی[13] و افراشتگی[14] به‌عنوان شاخص‌های شکل در نظر گرفته می‌شوند (Reynolds *et al.*, 2009).

رینولدز و همکاران (Reynolds *et al.*, 2014) کیفیت فیزیکی یک خاک با بافت لوم را در شرایط طولانی‌مدت کشت محصول مطالعه نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که شاخص مد اندازه منافذ، در منافذ ریز خاک دارای مقادیری بین ۲/۲ و ۴/۹۷ میکرومتر و در منافذ ساختمانی خاک دارای مقادیری بین ۱۸۰/۹ و ۶۵۸ میکرومتر بوده است. آنها معتقدند که گنجایش هوایی خاک و آب قابل استفاده عموماً توسط منافذ ریز خاک تعیین می‌گردد.

ابراهیم و هورتون (Ibrahim & Horton, 2021) در مطالعه‌ای پیرامون اثر استفاده از زغال زیستی[15] و کمپوست بر محتوای آب خاک و توزیع اندازه منافذ در خاک با بافت شن لومی دریافتند که اضافه نمودن زغال زیستی و کمپوست و همچنین مخلوط این دو ماده به خاک شن لومی به طور معنی‌داری مقادیر شاخص‌های موقعیت منحنی توزیع اندازه منافذ شامل میانگین، میانه و مد اندازه منافذ را در مقایسه با خاک شاهد کاهش می‌دهد. این محققین مقادیر شاخص‌های میانگین، میانه و مد اندازه منافذ در خاک شاهد را به‌ترتیب ۲۳/۵، ۲۵/۸ و ۳۱/۶ میکرومتر و شاخص‌های انحراف معیار، کشیدگی و افراشتگی منحنی را در خاک شاهد به‌ترتیب ۳/۳ میکرومتر، ۰/۱۶- و ۱/۱۴ گزارش نمودند.

کاستلینی و همکاران (Castellini *et al.*, 2014) تغییرات کیفیت فیزیکی خاک تحت دو نوع مدیریت بقایای گیاهی در خاک‌های رسی را مطالعه نمودند. نتایج مطالعه این محققین نشان داد که همه تیمارها دارای مقادیر بیشتر میانه و میانگین اندازه منافذ و مقادیر کمتر انحراف معیار منحنی توزیع اندازه منافذ نسبت به حدود بهینه پیشنهاد شده توسط رینولدز و همکاران (Reynolds *et al.*, 2009) بوده و تنها شاخص مد اندازه منافذ در محدوده بهینه این شاخص قرار داشت. شهاب و همکاران (Shahab *et al.*, 2013) در تحقیقی با هدف تعیین حدود بهینه شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ خاک، نمونه خاک‌های مورد مطالعه را براساس حدود بهینه هشت ویژگی فیزیکی خاک شامل ظرفیت مزرعه نسبی[16]، آب قابل استفاده، گنجایش هوایی، جرم مخصوص ظاهری، کربن آلی، شاخص پایداری ساختمان، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه[17] در حالت مرطوب و شاخص (S) که توسط رینولدز و همکاران (Reynolds *et al.*, 2009) پیشنهاد شده است، دسته‌بندی نمودند. این محققین دامنه تغییرات شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه منافذ در خاک‌های دسته اول را که بیشترین تعداد ویژگی فیزیکی در حدود بهینه را دارا بودند، به‌عنوان حدود بهینه برای این شاخص‌ها در اقلیم نیمه‌خشک ایران اعلام کردند.

کاستلینی و همکاران (Castellini *et al.*, 2013) دریافتند که شاخص‌های موقعیت منحنی توزیع اندازه منافذ در خاک‌های رسی تحت مدیریت بی‌خاک‌ورزی در دامنه حدود بهینه پیشنهادی توسط رینولدز و همکاران (Reynolds *et al.*, 2009) قرار دارند. کمتر بودن مقادیر انحراف معیار منحنی توزیع اندازه منافذ خاک از مقدار بهینه این شاخص در هر دو تیمار خاک‌ورزی، بیان‌گر یکنواختی نسبی بیشتر در اندازه منافذ خاک‌های مطالعه شده بود.

اوگالد و همکاران (Ugalde *et al.*, 2009) در مطالعه‌ای که با هدف بررسی اثر نوع خاک‌ورزی بر شاخص‌های فیزیکی کیفیت خاک و آب قابل استفاده گیاه در خاک‌های لوم سیلتی با کربنات کلسیم زیاد و کربن آلی کم در اقلیم نیمه‌خشک انجام دادند، دریافتند که بی‌خاک ورزی در مقایسه با شخم رایج باعث تغییر توزیع اندازه منافذ خاک و افزایش میزان منافذ ریز شده است.

کرامر و همکاران (Kraemer *et al.*, 2022) توزیع اندازه منافذ در

1- Soil pore size distribution (SPSD)
2- Plant available water
3- Least limiting water range
4- Integral water capacity
5- Integral energy
6- Soil moisture release curve (SMRC)
7- Location
8- Shape
9- Mode
10- Median
11- Mean
12- Standard deviation
13- Skewness
14- Kurtosis
15- Biochar
16- Relative field capacity (RFC)
17- Mean weight diameter (MWD)

دو خاک مالی‌سول و ورتی‌سول با تراکم‌های مختلف کشت در سامانه کشاورزی حفاظتی (بی‌خاک‌ورزی) در آرژانتین را مطالعه و اعلام نمودند بدون در نظر گرفتن نوع خاک، دو شاخص تخلخل درشت (منافذ بزرگ تر از ۳۰۰ میکرومتر) و مد اندازه منافذ رابطه بسیار نزدیکی با متغیرهای مدیریت کشاورزی داشته و به‌عنوان دو شاخص سلامت فیزیکی خاک در سامانه کشاورزی حفاظتی محسوب می‌گردند. این محققین برای پنج سانتی‌متر لایه سطحی خاک حدود بهینه شاخص‌های موقعیت منحنی توزیع اندازه منافذ شامل میانگین، میانه و مد اندازه منافذ را به‌ترتیب ۴۰/۹–۴/۶، ۵۸–۷/۸ و ۲۲۷–۷۱ میکرومتر و شاخص‌های شکل شامل انحراف معیار، کشیدگی و افراشتگی منحنی را به‌ترتیب ۵۷۷۹–۱۴/۶ میکرومتر، (۰/۳۰-)–(۰/۴۱-) و ۱/۱۶–۱/۱۳ اعلام نمودند.

جیبرتو و همکاران (Ghiberto *et al.*, 2015) جهت تعیین شاخص کیفیت فیزیکی[1] در خاک‌های مالی‌سول از حدود بهینه هشت خصوصیت فیزیکی خاک استفاده نمودند. آنها با استفاده از شاخص به دست آمده، خاک‌های مورد مطالعه را به چهار دسته تقسیم و مقادیر دامنه تغییرات شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه منافذ خاک در دسته اول (بیشترین مقادیر شاخص جمعی کیفیت فیزیکی) را به‌عنوان حدود بهینه این شاخص‌ها اعلام نمودند.

کی و همکاران (Qi *et al.*, 2009) نیز خاک‌های مختلف را بر اساس مقدار شاخص کیفیت خاک به چهار کلاس (یک بیشترین کیفیت و چهار کمترین کیفیت) دسته‌بندی نمودند. این محققین پس از محاسبه شاخص کیفیت خاک با استفاده از وزن‌دهی به متغیرهای انتخاب‌شده از طریق تجزیه مؤلفه‌های اصلی[2] و امتیازدهی آنها، مقادیر شاخص بیشتر از ۰/۷۸ را کلاس یک، ۰/۷۸–۰/۶۸ کلاس دو، ۰/۶۸–۰/۵۸ کلاس سه و مقادیر شاخص کمتر از ۰/۵۸ را کلاس چهار کیفیت نامیدند.

الکیسی (Al-Kayssi, 2022) در تحقیقی خاک‌های مورد مطالعه را براساس تعداد ویژگی و شاخص فیزیکی قرار گرفته در دامنه مطلوب به سه گروه تقسیم نمود. بر این اساس گروه با بیشترین تعداد ویژگی در دامنه مطلوب ملاک تعیین حدود بهینه شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ خاک قرار گرفت. این گروه شامل سه نمونه خاک با بافت لوم و لوم سیلتی بود که در آن به جز ویژگی جرم مخصوص ظاهری کلیه ویژگی‌های فیزیکی مطالعه شده شامل ظرفیت مزرعه نسبی، آب قابل استفاده، گنجایش هوایی، تخلخل درشت، شاخص پایداری خاک دانه، شاخص (S) و کربن آلی در دامنه مطلوب قرار داشت.

توزیع اندازه منافذ خاک به‌عنوان یکی از ویژگی‌های فیزیکی مهم که دیگر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک را تحت تأثیر قرار می دهد، می‌تواند نقش مهمی در راستای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک اراضی کشاورزی ایفا نماید. در این راستا شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ خاک، ابزاری مناسب به‌منظور مقایسه خاک‌های مختلف و همچنین مقایسه مقادیر شاخص‌های ذکر شده با مقادیر بهینه محسوب می‌گردند.

بررسی نتایج مطالعات قبلی حاکی از آن است که استفاده از حدود بهینه ارائه شده در منابع، مستلزم ارزیابی و انجام تحقیقات مشابه برای شرایط اقلیمی و خاک‌های ایران می‌باشد. از این رو پژوهش حاضر با هدف دستیابی به حدود بهینه شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه منافذ در شرایط خاک‌های ایران و مقایسه آنها با مقادیر بهینه شاخص‌های ذکر شده در منابع انجام شد. برای این منظور تعداد زیادی از ویژگی‌های فیزیکی خاک اندازه‌گیری و محاسبه و در قالب شاخص عددی کیفیت فیزیکی خاک تجمیع گردید. با استفاده از شاخص ذکر شده خاک‌های مورد مطالعه در چهار کلاس کیفیت دسته‌بندی شدند. در نهایت مقادیر حداقل و حداکثر در هریک از شاخص‌ها، مربوط به خاک‌های قرار گرفته در کلاس یک (بیشترین کیفیت فیزیکی نسبی) به‌عنوان حدود بهینه شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه منافذ در نظر گرفته شد.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

پژوهش حاضر در محدوده‌ای به وسعت حدود ۲۲۰ هکتار از اراضی ایستگاه تحقیقات طرق مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان‌رضوی واقع در جنوب شرقی شهر مشهد و در مختصات جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۳۹ دقیقه طول‌شرقی و ۳۶ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۴ دقیقه عرض‌شمالی انجام شد. ویژگی بارز خاک این ایستگاه تحقیقاتی وجود تنوع در خصوصیات خاک و به‌طور ویژه بافت خاک می‌باشد.

نمونه‌برداری از خاک

به‌منظور انجام بررسی جامع و دستیابی به اطلاعات دقیق‌تر، از ۳۰ نقطه در قسمت‌های مختلف ایستگاه با بافت و ساختمان متفاوت، یک نمونه دست‌خورده و یک نمونه دست‌نخورده خاک با استفاده از استوانه های فلزی با قطر ۵ و ارتفاع ۵/۳ سانتی‌متر از عمق صفر تا ۳۰ سانتی-متری هر نقطه به منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های مختلف تهیه گردید.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی

در این مطالعه ویژگی‌ها و شاخص‌های مختلف فیزیکی خاک اندازه‌گیری و محاسبه شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (Kroetsch & Wang, 2007) و پنج جزء شن با استفاده از سری

1- Soil physical quality index (SPQI)

2- Principal component analysis (PCA)

الک‌ها (Kroetsch & Wang, 2007) بر اساس طبقه‌بندی آمریکایی، جرم مخصوص حقیقی و ظاهری به‌ترتیب با استفاده از روش پیکنومتر و نمونه دست‌نخورده (Hao *et al.*, 2007)، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (Skjemstad & Baldock, 2007)، میانگین وزنی قطر خاکدانه به روش الک خشک با استفاده از سری الک‌ها (Larney, 2007)، پارامترهای منحنی رطوبتی خاک با برازش معادله وان‌گنوختن به داده‌های رطوبتی خاک در مکش‌های ۰، ۱۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ سانتی‌متر (با استفاده از دستگاه جعبه شن[1]) و مکش‌های ۳۳۰، ۱۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر (با استفاده از دستگاه صفحات فشاری) (Reynolds & Topp, 2007; Asgarzadeh *et al.*, 2010) اندازه‌گیری شد. مقاومت فروروی خاک با استفاده از فروسنج[2] مخروطی ساخت شرکت ایکل‌کمپ[3] با مخروط دارای زاویه ۶۰ درجه و سطح مقطع یک سانتی‌متر مربع، اندازه‌گیری و همزمان با هر اندازه‌گیری، یک نمونه خاک جهت تعیین رطوبت به روش وزنی تهیه گردید. در این پژوهش، ظرفیت مزرعه نسبی در قالب نسبت رطوبت در نقطه ظرفیت مزرعه به رطوبت در نقطه اشباع (Zangiabadi *et al.*, 2016)، شاخص S از طریق محاسبه شیب منحنی رطوبتی خاک در حالت خشک شدن در نقطه عطف آن (Zangiabadi *et al.*, 2017)، شاخص پایداری خاک‌دانه در قالب نسبت کربن آلی به مجموع رس و سیلت خاک (Reynolds *et al.*, 2009)، شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه منافذ (Reynolds *et al.*, 2009; Zangiabadi *et al.*, 2017)، تخلخل و گنجایش هوایی به تفکیک منافذ درشت و ریز (Zangiabadi *et al.*, 2016)، آب قابل استفاده و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت ۱۰۰ و ۳۳۰ (ظرفیت مزرعه در دو مکش ۱۰۰ و ۳۳۰ سانتی‌متر) (Zangiabadi *et al.*, 2017; Asgarzadeh *et al.*, 2010)، گنجایش انتگرالی آب (Zangiabadi *et al.*, 2016) و انرژی انتگرالی دامنه‌های مختلف رطوبتی (Asgarzadeh *et al.*, 2011; Zangiabadi *et al.*, 2017) با استفاده از روابط مربوطه که به تشریح در منابع توضیح داده شده است، محاسبه گردید.

شاخص کیفیت فیزیکی خاک

شاخص کیفیت فیزیکی خاک در قالب چهار مرحله ۱) انتخاب مهم ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک با استفاده از تجزیه مؤلفه‌های اصلی (بدون در نظر گرفتن شاخص‌های شکل و موقعیت منحنی توزیع اندازه منافذ)، ۲) وزن‌دهی ویژگی‌های منتخب، ۳) امتیازدهی ویژگی‌های منتخب و ۴) محاسبه شاخص نهایی با استفاده از رابطه شماره ۱، تعیین گردید. در این رابطه SPQI: شاخص کیفیت فیزیکی خاک، Si: امتیاز هر ویژگی، Wi: وزن هر ویژگی، و n: تعداد ویژگی‌های منتخب می‌باشد (Masto *et al.*, 2008).

$$SPQI = \sum_{i=1}^{n} W_i S_i \qquad (۱)$$

مقدار شاخص کیفیت فیزیکی خاک بین صفر و یک متغیر است. بر این اساس خاک‌های با مقادیر شاخص نزدیک به یک مطلوب‌ترین و خاک‌های با مقادیر شاخص نزدیک به صفر ضعیف‌ترین خاک‌ها از نظر کیفیت فیزیکی محسوب می‌شوند (Zangiabadi *et al.*, 2021).

تعیین حدود بهینه شاخص‌های شکل و موقعیت منحنی توزیع اندازه منافذ خاک

با استفاده از شاخص کیفیت فیزیکی خاک، خاک‌های مورد مطالعه در کلاس‌های یک تا چهار دسته‌بندی شدند (Qi *et al.*, 2009). مقادیر حداقل هر یک از شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ مربوط به خاک‌های قرار گرفته در کلاس یک (بیشترین کیفیت فیزیکی نسبی) به‌عنوان حد پائین و مقادیر حداکثر به‌عنوان حد بالا و دامنه بین آنها به عنوان حدود بهینه شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه منافذ تعیین گردید (Ghiberto *et al.*, 2015).

نرم‌افزارهای مورد استفاده

برای تعیین پارامترهای منحنی رطوبتی خاک از نرم‌افزار RETC[4]، انجام محاسبات ریاضی در راستای تعیین مقدار شاخص‌های گنجایش انتگرالی آب و انرژی انتگرالی دامنه‌های مختلف رطوبتی از نرم‌افزار Mathcad Prime 3، جهت تجزیه مؤلفه‌های اصلی و وزن‌دهی به متغیرها از نرم‌افزار آماری JMP نسخه ۹/۰۲، امتیازدهی متغیرها و محاسبه شاخص کیفیت خاک و تعیین حدود بهینه شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ از نرم‌افزار اکسل استفاده گردید.

نتایج و بحث

خاک محدوده مورد مطالعه در پنج کلاس لوم، لوم شنی، لوم سیلتی، لوم رسی و لوم رسی سیلتی طبقه‌بندی گردید. خاک‌های با بافت لوم دارای فراوانی ۴۰ درصد، لوم سیلتی ۲۳ درصد، لوم رسی سیلتی ۱۷ درصد، لوم رسی ۱۳ درصد و لوم شنی ۷ درصد بود. میانگین جرم مخصوص ظاهری در نمونه خاک‌های مطالعه شده ۱/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و کربن آلی در دامنه‌ای بین ۱/۰۵- ۰/۲۶ درصد متغیر بود. نتایج بررسی ساختمان خاک در قالب میانگین وزنی قطر خاک‌دانه نشان داد که به طور میانگین خاک‌دانه‌های با قطر ۱-۰/۵ میلی‌متر بیشترین سهم و خاک‌دانه‌های با قطر ۰/۲۵-۰ میلی‌متر کمترین سهم را به خود اختصاص داده‌اند. مقدار شاخص میانگین وزنی قطر خاک‌دانه

1- Sand box
2- Penetrometer
3- Eijkelkamp
4- Retention curve program

نیز دارای دامنه‌ای بین ۲/۸۸-۰/۹۴ میلی‌متر و میانگینی برابر با ۱/۹۳ میلی‌متر بود. نتایج محاسبه شاخص (S) نشان داد که مقدار این شاخص در دامنه‌ای بین ۰/۰۷۰-۰/۰۲۹ و میانگین ۰/۰۴۶ می‌باشد. با استفاده از مقدار این شاخص، خاک‌ها از منظر کیفیت فیزیکی در قالب چهار دسته کیفیت فیزیکی خیلی‌خوب (بیش از ۰/۰۵)، خوب (۰/۰۵-۰/۰۳۵)، ضعیف (۰/۰۳۵-۰/۰۲) و خیلی‌ضعیف (کمتر از ۰/۰۲) قرار می‌گیرند (Reynolds *et al*., 2009). نتایج به دست آمده در این مطالعه خاکی از آن است که هیچ‌یک از نمونه‌های خاک در دسته ساختمان خیلی ضعیف قرار نگرفته است (Zangiabadi *et al*., 2017).

جدول ۱ حداقل، حداکثر و میانگین مقادیر شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی‌های توزیع اندازه منافذ در خاک‌های مطالعه شده را نشان می‌دهد.

شاخص‌های شکل منحنی توزیع اندازه منافذ بیانگر وضعیت منافذ موجود در هر خاک در مقایسه با حالت لوگ نرمال است. در این خصوص شاخص کشیدگی منفی بیانگر زیادی نسبی منافذ کوچک، کشیدگی مثبت بیانگر زیادی نسبی منافذ بزرگ و کشیدگی صفر نشان‌دهنده توزیع لوگ نرمال اندازه منافذ در نمونه خاک می‌باشد.

در همین راستا شاخص انحراف معیار برابر با یک خاکی از یکسان بودن اندازه منافذ در نمونه خاک و مقادیر بیش از یک نشان‌دهنده وجود تنوع در اندازه منافذ خاک می‌باشد (Reynolds *et al*., 2009).

شاخص مد در جدول ۱ حاکی از آن است که به طور میانگین منافذ با اندازه ۶۰ میکرومتر بیشترین فراوانی را در نمونه‌های خاک مطالعه شده دارند. با نگاهی به مقادیر حداکثر و حداقل شاخص میانگین اندازه منافذ و همچنین دامنه تغییرات شاخص انحراف معیار منحنی توزیع می‌توان به وجود تنوع اندازه منافذ در نمونه‌های خاک یا به بیان دیگر وجود منافذ با اندازه‌های متفاوت در خاک‌های مورد مطالعه پی برد.

منحنی‌های توزیع اندازه منافذ و شاخص‌های مربوطه برای دو نمونه خاک با بافت لوم رسی و لوم شنی به‌ترتیب در شکل ۱ و جدول ۲ ارائه شده است. مقایسه این دو منحنی و مقادیر شاخص‌های موقعیت و شکل آنها نشان می‌دهد که خاک لوم رسی نسبت به خاک لوم شنی دارای منافذ به مراتب کوچکتر و با تنوع اندازه بیشتر می‌باشد.

جدول ۱- مقادیر شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی‌های توزیع اندازه منافذ خاک

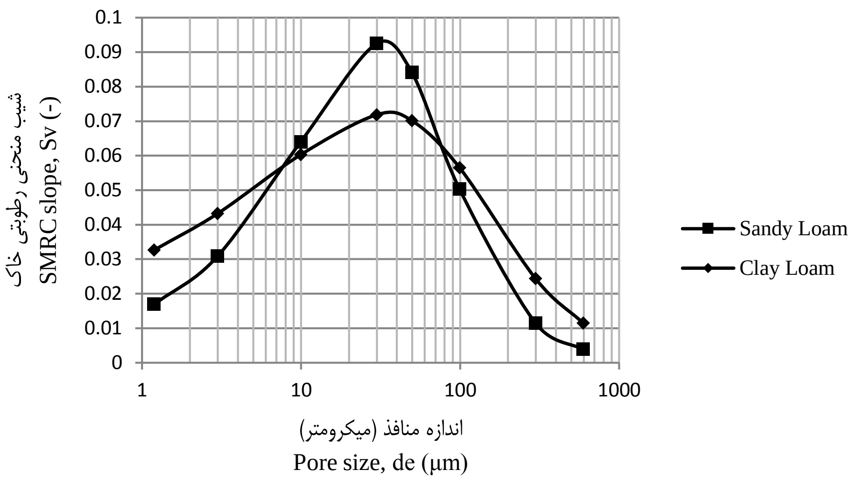
Table 1- Soil pore size distribution curves location and shape parameters

	شکل (Shape)			موقعیت (Location)		
	افراشتگی (Kurtosis)	کشیدگی (Skewness)	انحراف معیار (SD) (µm)	میانگین (d_{mean}) (µm)	میانه (d_{median}) (µm)	مد (d_{mode}) (µm)
حداقل (Min)	1.14	-0.41	5.17	0.5	1.7	19.4
حداکثر (Max)	1.16	-0.21	254.36	25.1	64.8	486.9
میانگین (Mean)	1.15	-0.36	71.56	6.5	12.4	60.3

جدول ۲- مقادیر شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی‌های توزیع اندازه منافذ خاک برای دو نمونه خاک با بافت متفاوت

Table 2- Soil pore size distribution curve location and shape parameters for two soil samples with different soil textures

بافت خاک (Soil texture)	شکل (Shape)			موقعیت (Location)		
	افراشتگی (Kurtosis)	کشیدگی (Skewness)	انحراف معیار (SD) (µm)	میانگین (d_{mean}) (µm)	میانه (d_{median}) (µm)	مد (d_{mode}) (µm)
لوم رسی (Clay loam)	1.16	-0.33	21.18	6.9	11.6	34.0
لوم شنی (Sandy loam)	1.15	-0.21	5.17	17.9	21.4	31.1



شکل ۱- منحنی توزیع اندازه منافذ برای دو نمونه خاک با بافت متفاوت

Figure 1- Soil pore size distribution curves for two soil samples with different soil textures

از مجموع ۳۵ ویژگی و شاخص فیزیکی اندازه‌گیری و محاسبه شده در این مطالعه، تجزیه مؤلفه‌های اصلی با استفاده از ماتریس همبستگی مربوط به ۲۹ ویژگی فیزیکی خاک انجام شد. نتایج نشان داد چهار ویژگی فیزیکی خاک شامل آب قابل استفاده (۳۳۰) با دامنه مقادیر بین ۰/۲۰-۰/۱۰ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب، تخلخل کل با دامنه مقادیر بین ۰/۵۱-۰/۴۰ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (۱۰۰) با دامنه مقادیر بین ۰/۲۲-۰/۱۲ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب و شاخص پایداری خاک‌دانه با دامنه مقادیر بین ۲/۶۱-۰/۷۶ درصد، می‌توانند حدود ۸۸ درصد مجموع واریانس خاک‌های مورد مطالعه را توجیه نمایند (Zangiabadi *et al.*, 2021). مشابه این نتیجه در خصوص تخلخل کل و آب قابل استفاده قبلاً توسط شون‌هولتز و همکاران (Schoenholtz *et al.*, 2000) و رینولدز و همکاران (Reynolds *et al.*, 2008) نیز گزارش شده است.

وزن هر ویژگی انتخاب شده در قالب تجزیه مؤلفه‌های اصلی از طریق محاسبه نسبت واریانس جزئی مؤلفه مربوط به آن ویژگی به واریانس تجمعی مجموع مؤلفه‌های اصلی با مقدار ویژه بزرگ‌تر از یک، محاسبه شد (Masto *et al.*, 2008). بر این اساس آب قابل استفاده (۳۳۰) با وزن ۰/۴۶، تخلخل کل با وزن ۰/۳۱، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (۱۰۰) با وزن ۰/۱۵ و شاخص پایداری خاک‌دانه با وزن ۰/۰۸ در محاسبات شاخص کیفیت فیزیکی خاک لحاظ شدند.

به‌منظور بدون واحد نمودن ویژگی‌های انتخاب شده (تبدیل مقدار به امتیاز)، از توابع امتیازدهی خطی استفاده شد. توابع امتیازدهی دارای سه شکل صعودی (مقادیر بیشتر بهتر)، نزولی (مقادیر کمتر بهتر) و زنگوله‌ای (مقادیر بهینه بهتر) می‌باشند. در این مطالعه از روش امتیازدهی صعودی (مقادیر بیشتر بهتر) برای هر چهار ویژگی انتخاب شده به‌منظور تبدیل مقادیر ویژگی‌ها به امتیاز (دامنه بین صفر و یک)، استفاده گردید (Velasquez *et al.*, 2007; Masto *et al.*, 2008; Zangiabadi *et al.*, 2021).

در نهایت با در نظر گرفتن وزن و امتیاز ویژگی‌های انتخاب شده، شاخص کیفیت فیزیکی برای ۳۰ نمونه خاک با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد (Masto *et al.*, 2008).

$$SPQI = 0.46 * S_{PAW330} + 0.31 * S_{POR} + 0.15 * S_{LLWR100} + 0.08 * S_{SI} \quad (۲)$$

در این رابطه SPQI معادل شاخص کیفیت فیزیکی خاک و S_{PAW330}، S_{POR}، $S_{LLWR100}$ و S_{SI} به‌ترتیب امتیاز ویژگی‌های آب قابل استفاده (۳۳۰)، تخلخل کل، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (۱۰۰) و شاخص پایداری خاک‌دانه می‌باشند.

بیشترین و کمترین مقدار شاخص کیفیت فیزیکی خاک در محدوده مورد مطالعه به‌ترتیب ۰/۸۴ و ۰/۱۴ محاسبه شد.

نتایج بررسی شاخص کیفیت فیزیکی برای ۳۰ نمونه خاک مورد مطالعه حاکی از آن است که پنج نمونه خاک با داشتن شاخص بزرگتر از ۰/۷۸ در کلاس یک کیفیت فیزیکی (بیشترین کیفیت نسبی) خاک قرار دارند (Qi *et al.*, 2009). بر این اساس مقادیر بین حداقل و حداکثر شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه منافذ در این پنج نمونه خاک بیانگر حدود بهینه این شاخص‌ها می‌باشد.

جدول ۳ مقادیر حداقل و حداکثر شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ خاک در کلاس یک شاخص کیفیت فیزیکی خاک و حدود بهینه ارائه شده در منابع را نشان می‌دهد.

جدول ۳- مقادیر حداقل و حداکثر شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ خاک در خاک‌های با بیشترین شاخص کیفیت فیزیکی خاک و حدود بهینه ارائه شده در منابع

Table 3- The minimum and maximum values of soil pore size distribution curves parameters for the soils with the highest SPQI and the optimal ranges in the literature

		موقعیت (Location)			شکل (Shape)		
		مد (d_{mode}) (µm)	میانه (d_{median}) (µm)	میانگین (d_{mean}) (µm)	انحراف معیار (SD) (µm)	کشیدگی (Skewness)	افراشتگی (Kurtosis)
حداقل (Min)		29	5	2	22	-0.38	1.14
حداکثر (Max)		92	16	7	81	-0.33	1.15
حدود بهینه (Optimal range)	Reynolds *et al.*, 2009	60-140	3-7	0.7-2	400-1000	(-0.43) -(-0.41)	1.13-1.14
	Shahab *et al.*, 2013	10-45	3-13	1-7	8-95	(-0.40) -(-0.25)	1.15-1.16
	Ghiberto *et al.*, 2015	31-39	3.4-6.8	1.2-3	68.7-145.4	(-0.40) -(-0.38)	1.14-1.15
	Al-Kayssi, 2022	22-330	3-200	1-160	7-90	(-0.39) -(-0.24)	1.15-1.16

بررسی نتایج ارائه شده در جدول ۳ و مقایسه آن با نتایج مطالعات قبلی در این خصوص نشان داد که منافذ خاک در خاک‌های با بیشترین کیفیت فیزیکی نسبی در این مطالعه به طور میانگین از اندازه بزرگتر و تنوع اندازه کمتری (یکنواختی بیشتر) برخوردار هستند. کاستلینی و همکاران (Castellini *et al.*, 2014) نیز مقادیر بیشتر میانگین اندازه منافذ و مقادیر کمتر انحراف معیار منحنی توزیع اندازه منافذ نسبت به حدود بهینه پیشنهاد شده توسط رینولدز و همکاران (Reynolds *et al.*, 2009) را گزارش نموده و معتقدند که ممکن است حدود بهینه پیشنهاد شده توسط این محققین برای طیف وسیعی از خاک‌های کشاورزی قابل استفاده نباشد و لذا باید حدود بهینه شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ خاک در دامنه بزرگتری از کاربری اراضی، مدیریت و بافت خاک ارزیابی گردد. حدود بهینه ارائه شده در این مطالعه برای دو شاخص میانگین و انحراف معیار منحنی توزیع اندازه منافذ با حدود بهینه ارائه شده برای این دو شاخص در مطالعه شهاب و همکاران (Shahab *et al.*, 2013) و برای شاخص انحراف معیار در مطالعه الکیسی (Al-Kayssi, 2022) مطابقت دارد.

بررسی حدود بهینه شاخص کشیدگی منحنی توزیع اندازه منافذ حاکی از آن است که فراوانی نسبی منافذ کوچک خاک در مطالعات قبلی بیشتر از این مطالعه است. اما در مجموع حدود بهینه شاخص کشیدگی نیز انطباق بیشتری با نتایج شهاب و همکاران (Shahab *et al.*, 2013) دارد.

مقادیر بهینه شاخص افراشتگی منحنی توزیع اندازه منافذ در این مطالعه با حدود بهینه گزارش شده در منابع هم‌خوانی دارد. مقدار بهینه این شاخص با نتیجه مطالعه جیبرتو و همکاران (Ghiberto *et al.*, 2015) کاملاً منطبق است.

شاخص‌های میانه و مد اندازه منافذ خاک در خاک‌های با کیفیت فیزیکی نسبی بیشتر در این مطالعه نسبت به دیگر شاخص‌های بررسی شده هم‌خوانی کمتری با حدود بهینه ارائه شده در منابع دارند. بزرگتر بودن شاخص میانه در مقایسه با مقادیر پیشنهادی رینولدز و همکاران (Reynolds *et al.*, 2009) توسط کاستلینی و همکاران (Castellini *et al.*, 2014) نیز گزارش شده است.

در مجموع می‌توان گفت به جز شاخص مد در بقیه شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه منافذ خاک، هم‌خوانی بسیار زیادی بین نتایج این مطالعه با حدود بهینه ارائه شده توسط شهاب و همکاران (Shahab *et al.*, 2013) وجود دارد. تطابق نتایج این دو مطالعه حاکی از آن است که روش محاسبه شاخص کیفیت فیزیکی خاک و استفاده از دسته خاک‌های با بزرگترین مقدار این شاخص و روش استفاده از مقادیر بهینه ویژگی‌های فیزیکی خاک و استفاده از دسته خاک‌های با بیشترین تعداد ویژگی در دامنه مطلوب، روش‌های مناسبی برای تعیین حدود بهینه شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ خاک می‌باشند. لذا استفاده از نتایج این دو مطالعه به منظور ارزیابی و مقایسه کیفیت فیزیکی خاک‌های با بافت متوسط و سبک مناطق با اقلیم نیمه‌خشک ایران توصیه می‌گردد.

نتیجه‌گیری

دستیابی به حدود بهینه شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ خاک به‌عنوان یکی از ویژگی‌های فیزیکی مهم که دیگر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد، می‌تواند نقش مهمی در راستای مقایسه و مدیریت کیفیت فیزیکی خاک اراضی کشاورزی ایفا نماید. نتایج انجام این مطالعه که بر پایه استفاده از

شاخص کیفیت فیزیکی خاک برای تعیین حدود بهینه شاخص‌های ذکر شده قرار دارد حاکی از آن است که خاک‌های با بیشترین کیفیت فیزیکی نسبی، دارای منافذ با میانگین اندازه بزرگتر و تنوع اندازه کمتر از مقادیر بهینه ارائه شده در منابع می‌باشند. در این مطالعه حدود بهینه شاخص‌های موقعیت منحنی توزیع اندازه منافذ شامل میانگین، میانه و مد اندازه منافذ به‌ترتیب ۷-۲، ۱۶-۵ و ۹۲-۲۹ میکرومتر و شاخص‌های شکل شامل انحراف معیار، کشیدگی و افراشتگی منحنی به‌ترتیب ۸۱-۲۲ میکرومتر، (۰/۳۳-)-(۰/۳۸-) و ۱/۱۵-۱/۱۴ تعیین گردید.

منابع

1. Al-Kayssi, A.W. (2022). Quantifying soil physical quality by using indicators and pore volume-function characteristics of the gypsiferous soils in Iraq. *Geoderma Regional*, *30*, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00556
2. Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nosrati, A., & Dexter, A.R. (2010). Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant and Soil*, *335*(1), 229–244.https://doi.org/10.1007/s11104-010-0410-6
3. Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nosrati, A., & Dexter, A.R. (2011). Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. *Geoderma*, *166*, 34–42. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.06.009
4. Castellini, M., Niedda, M., Pirastru, M., & Ventrella, D. (2014). Temporal changes of soil physical quality under two residue management systems. *Soil Use Management*, *30*, 423–434. https://doi.org/10.1111/sum.12137
5. Castellini, M., Pirastru, M., Niedda, M., & Ventrella, D. (2013). Comparing physical quality of tilled and no-tilled soils in an almond orchard in south Italy. *Italian Journal of Agronomy*, *8*, 149–157. https://doi.org/10.4081/ija.2013.e20
6. Ghiberto, P.J., Imhoff, S., Libardi, P.L., Da Silva, A.P., Tormena, C.A., & Pilatti, M. (2015). Soil physical quality of Mollisols quantified by a global index. *Scientia Agricola*, *72*(2), 167–174. https://doi.org/10.1590/0103-9016-2013-0414
7. Hao, X., Ball, B.C., Culley, J.L.B., Carter, M.R., & Parkin, G.W. (2007). Soil density and porosity. p. 743-760. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (eds.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2nd ed. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis.
8. Ibrahim, A. and Horton, R. (2021). Biochar and compost amendment impacts on soil water and pore size distribution of a loamy sand soil. *Soil Science Society of America Journal*, *85*, 1021-1036. https://doi.org/10.1002/saj2.20242
9. Kraemer, F.B., Castiglioni, M., Morras, H., Fernandez, P., & Alvarez, C. (2022). Pores size distribution and pores volume density of Mollisols and Vertisols under different cropping intensity managements with no-tillage. *Geoderma*, *405*, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115398
10. Kroetsch, D., & Wang, C. (2007). Particle size distribution. p. 713–725. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (eds.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2nd ed. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis.
11. Larney, F.J. (2007). Dry-aggrigate size distribution. p. 821–831. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (eds.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2nd ed. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis.
12. Masto, R.E., Chhonkar, P.K., Singh, D., & Patra, A.K. (2008). Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilization and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental Monitoring and Assessment*, *136*(1-3), 419–435. https://doi.org/10.1007/s10661-007-9697-z
13. Qi, Y., Darilek, J.L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., & Gu, Z. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, *149*, 325–334. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.015
14. Reynolds, W.D., & Clarke Topp, G. (2007). Soil water desorption and imbibition: tension and pressure techniques. p. 981-997. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (eds.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2nd ed. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis.
15. Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., & Yang, X.M. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, *152*, 252–263. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009
16. Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., & Tan, C.S. (2008). Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*, *146*, 466–474. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.06.017
17. Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., Tan, C.S., & Yang, J.Y. (2014). Impacts of 48 years of consistent cropping, fertilization and land management on the physical quality of a clay loam soil. *Canadian Journal of Soil Science*, *94*(3), 403–419. https://doi.org/10.4141/cjss2013-097
18. Schoenholtz, S.H., Van Miegroet H., & Burger, J.A. (2000). A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, *138*, 335-356. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00423-0
19. Shahab, H., Emami, H., Haghnia, G.H., & Karimi, A. (2013). Pore size distribution as a soil physical quality index

for agricultural and pasture soils in North-Eastern Iran. *Pedosphere*, *23*(3), 312-320. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60021-1
20. Skjemstad, J.O., & Baldock, J.A. (2007). Total and organic carbon. p. 225–237. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (eds.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2nd ed. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis.
21. Ugalde, O.F., Virto, I., Bescansa, P., Imaz, M.J., Enrique, A., & Karlen, D.L. (2009). No-tillage improvement of soil physical quality in calcareous, degradation-prone, semiarid soils. *Soil and Tillage Research*, *106*, 29–35. https://doi.org/10.1016/j.still.2009.09.012
22. Velasquez, E., Lavelle, P., & Andrade, M. (2007). GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology & Biochemistry*, *39*, 3066–3080. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.06.013
23. Zangiabadi, M., Gorji, M., Ghalebi, S., &RamezaniMoghaddam, M.R. (2017). Effects of soil pore size distribution on integral energy of different soil water ranges. *Soil Research*, *31*(3), 463–472. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/ijsr.2017.113755
24. Zangiabadi, M., Gorji, M., & Keshavarz, P. (2021). Determination of soil physical quality index in medium to coarse-textured soils of Khorasan-Razavi province. *Journal of Water and Soil*, *35*(1), 107–119. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2020.15000.0
25. Zangiabadi, M., Gorji, M., Shorafa, M., Khavari Khorasani, S., &Saadat, S. (2016). The Relationship between Integral Water Capacity (IWC) Index and Some Physical Properties in Khorasan-Razavi Province. *Journal of Water and Soil*, *30*(4), 1192–1201. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.v30i4.47544